

Adriana SZYDŁOWSKA, Jerzy HAPANOWICZ

e-mail: a.szydłowska@doktorant.po.edu.pl

Katedra Inżynierii Procesowej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska, Opole

## Wpływ obecności piany metalowej w rurze na hydrodynamikę przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz

### Wstęp

Procesom przetwarzania różnych substancji zawsze towarzyszy zapotrzebowanie na energię do wykonania nad nimi pracy (tłoczenie, mieszanie, itp.). Poprawne projektowanie procesów i aparatury niezbędnej do ich realizacji wymaga znajomości przebiegu zjawisk hydrodynamicznych, jakie im towarzyszą oraz ich matematycznego opisu. W odniesieniu do procesów zachodzących z udziałem mieszanin wielofazowych często mamy do czynienia z przepływem dwufazowym gaz-ciecz, któremu mogą towarzyszyć zjawiska ruchu ciepła.

Prace badawcze nad intensyfikacją ruchu ciepła prowadzone są od wielu lat. W ich wyniku powstało wiele rozwiązań zaimplementowanych do budowy wymienników ciepła, jak np. rury zintegrowane z żebrami, z regularnie natłoczonymi wgłębieniami, rury pofalowane, a także z wewnętrzną tzw. skręconą taśmą, pełniącą poniekąd rolę żebra wewnętrznego rury [Ji i in., 2015]. Rozwiązania te wzmagają wymianę ciepła, gdyż z jednej strony pozwalają rozwinąć powierzchnię jego wnikania, a z drugiej wywołują dodatkowe turbulencje intensyfikujące zjawisko konwekcji ciepła w płynącej substancji. Z najnowszych doniesień literaturowych [Abadi i in., 2016] wynika, że piana metalowa w podobnym stopniu przyczynia się do intensyfikacji wymiany ciepła względem wcześniej opracowanych rozwiązań, jednak stwarza przy tym znacznie niższe opory przepływu.

### Przepływ układów wielofazowych przez piany metalowe

Wielu badaczy podjęło już rozważania zagadnień dotyczących zarówno wymiany ciepła, jak i hydrodynamiki przepływu jednofazowego zarówno cieczy, jak i gazu w rurze wypełnionej pianą metalową. Znacznie mniej dostępnych jest opracowań odnoszących się do przepływu przez piany metalowe układów wielofazowych. Dotyczą one głównie przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz. W pracach [Ji i Xu, 2012; Hu i in., 2013] podjęto próby opracowania modeli obliczania jednostkowych oporów przepływu (strat ciśnienia  $\Delta P$  przypadających na grubość warstwy (długość) wypełnienia  $L$ ) układu dwufazowego gaz-ciecz  $(\Delta P/L)_{2F}$ , których podstawą jest klasyczny w mechanice płynów model rozdzielony

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{2F} = \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_G \Phi_G^2 + \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_C \Phi_C^2 \quad (1)$$

Bezwymiarowy parametr  $\Phi$  stanowi poprawkę uwzględniającą obecność w kanale przepływowym drugiej fazy, a jego indeksy  $G$  i  $C$  odnoszą się odpowiednio do gazu i cieczy. Jednak jak wskazano w pracy [Dyga, 2015], opracowane modele obliczeniowe dotyczą przepływu wrzącego czynnika chłodniczego, co zawęża ich stosowalność. W związku z tym dokonano opisu matematycznego oporów przepływu układu gaz-ciecz na podstawie badań eksperymentalnych dotyczących układów powietrze-woda i powietrze-olej. Metoda opracowana przez autora pracy [Dyga, 2015] przyjęła postać

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{2F} = \left[\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_G + \left(\frac{\Delta P}{L}\right)_C\right] \Phi_{\Delta P} \quad (2)$$

w której bezwymiarowy parametr  $\Phi_{\Delta P}$  nazywany jest liczbą wzmocnienia oporów przepływu, a definiuje się go, jako

$$\Phi_{\Delta P} = 1 + C \operatorname{Re}_C^{-1} \operatorname{Re}_G^n \left[ \left( \frac{\eta_C}{\eta_w} \right) \left( \frac{\rho_w}{\rho_C} \right)^2 \right]^{c^2} \quad (3)$$

gdzie:  $Re$  – liczba *Reynoldsa*,  $\eta$  – lepkość [Pa·s],  $\rho$  – gęstość [kg/m<sup>3</sup>],

indeks  $w$  odnosi się do wody, a wykładniki  $c1$  oraz  $n$  są stałymi.

Model (2) jest jedną z nielicznych metod obliczania oporów przepływu dwufazowego dwuskładnikowego układu gaz-ciecz w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową. Alternatywą są dostępne w literaturze metody obliczeniowe odnoszące się do przepływu układu gaz-ciecz przez ośrodki porowate, jako ogólną grupę materiałów porowatych. Jedną z wcześniejszych tego typu metod zaprezentowaną w pracy [Ford, 1960] wyraża zależność

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{2F} = 0,0407 \hat{g} \rho_C \operatorname{Re}_C^{0,29} \operatorname{Re}_G^{0,57} \frac{\eta_C}{\eta_G} \quad (4)$$

gdzie liczbę *Reynoldsa* faz oblicza się osobno dla każdej fazy zgodnie z równaniem

$$\operatorname{Re} = \frac{w_o d_p \rho}{\eta} \quad (5)$$

w którym  $w_o$  – prędkość pozorną,  $d_p$  – średnica pora. Jedną z nowszych adaptacji modelu homogenicznego wyrażanego równaniem *Darcy'ego-Weisbacha*

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{2F} = \lambda \frac{w_{2F}^2 \cdot \rho_{2F}}{2} \cdot \frac{1}{d} \quad (6)$$

na potrzeby obliczania oporów przepływu dwufazowego przez ośrodki porowate podano w pracy [Jamialahmadi i in., 2005]

$$\left(\frac{\Delta P}{L}\right)_{2F} = \lambda \frac{6(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} w_{2F}^2 \cdot \rho_{2F} \cdot \frac{1}{d_p} \quad (7)$$

W równaniu (7) liczba oporów przepływu  $\lambda$  jest zdefiniowana, jako

$$\lambda = 94 \left( \frac{\operatorname{Re}_C^{1,11}}{\operatorname{Re}_G^{1,8}} \right) + 4,4 \quad (8)$$

gdzie:  $\varepsilon$  – porowatość, a  $Re$  oblicza się wg równ. (5).

Brak jest jednak w literaturze przedmiotu jednoznacznego opisu hydrodynamiki przepływu dwufazowego gaz-ciecz w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową, co wymusza konieczność prowadzenia dalszych badań w tym zakresie. Ich wyniki pozwolą na lepsze poznanie i opisanie hydrodynamiki przepływu mieszaniny cieczy i gazu przez tego rodzaju materiały.

W niniejszej pracy opisano wpływ piany metalowej na hydrodynamikę przepływu układu powietrze-woda w rurze poziomej.

### Badania doświadczalne

Przedmiotem badań były pomiary spadków ciśnienia podczas przepływu układu dwufazowego gaz-ciecz w rurze poziomej wypełnionej pianą metalową. Warunki przepływu zestawiono w tab. 1.

**Aparatura.** Woda tłoczona była ze zbiornika hydroforowego, natomiast powietrze dostarczano z kompresora za pośrednictwem zaworu redukcyjnego. Zadawane strumienie każdej z faz mierzono z osobna, uzyskując w ten sposób sumaryczny strumień płynącej substancji.

**Piana metalowa.** Do wypełnienia odcinka testowego użyto walcowych elementów wykonanych z piany aluminiowej produkcji *GoodFellow*<sup>®</sup>, które pokazano na rys. 1.

Tab. 1. Zakres badań doświadczalnych

Faza	Prędkość przepływu	Natężenie strumienia masy	Wlotowy udział objętości
	$w_f$ [m/s]	$g_f$ [kg/(m <sup>2</sup> s)]	$\zeta_f$ [-]
gazowa: powietrze	0,86	1,02÷1,16	0,86÷0,98
ciekła: woda	0,02÷0,14	17,79÷137,64	0,02÷0,14



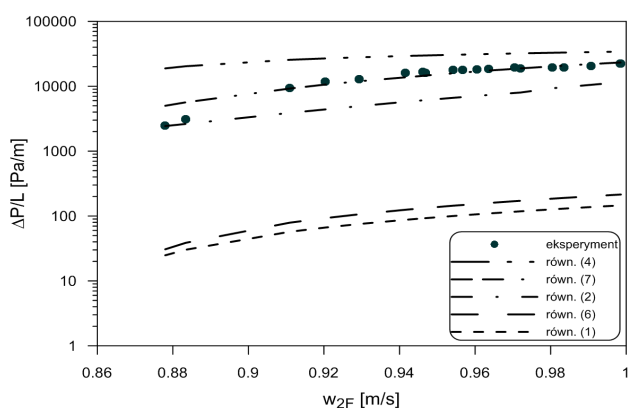
Rys. 1. Alumiiniowa piana metalowa (40 PPI)

Ich średnica ściśle odpowiadała średnicy wewnętrznej rury. Gęstość upakowania porów wykorzystanej piany to 40 PPI (*pores per inch*), a jej porowatość 93%.

**Metodyka.** Mieszanina dwufazowa formowała się na odcinku pustej rury o długości przekraczającej jej 50 średnic i stanowiącej tzw. odcinek rozbiegowy. Ustabilizowany co do swojej struktury układ dwufazowy przepływał następnie przez odcinek rury wypełnionej pianą metalową. Na jego długości mierzono różnicę ciśnienia statycznego substancji, czyli opory jej przepływu przez pianę. Czujniki ciśnienia połączone były z rurą przepływową za pośrednictwem grawitacyjnych separatorów faz. Segment testowy stanowiska stanowiły trzy odcinki o długości 15 cm każdy. Jako wartość mierzonych oporów przepływu dla danego strumienia mieszaniny dwufazowej przyjmowano średnią arytmetyczną z wartości oporów zmierzonych na tych odcinkach. Przed i za odcinkiem testowym znajdowały się krótkie odcinki przezroczystej rury. Pełniły one funkcję wzniesień umożliwiających identyfikację struktur przepływu dwufazowego. Średnica rury przepływowej na całej długości stanowiska badawczego była równa 0,01 m. Badania prowadzono w temperaturze otoczenia.

## Wyniki i ich analiza

Zyskaną w wyniku przeprowadzonych badań serię punktów pomiarowych naniesiono na wykres jednostkowych oporów przepływu w funkcji prędkości przepływu układu dwufazowego (Rys. 2).



Rys. 2. Jednostkowe opory przepływu układu gaz-ciecz w funkcji prędkości przepływu

Porównanie naniesionych na wykres wyników eksperymentu z wartościami obliczonymi wg równ. (2), (4) i (7) pokazuje (Rys. 2) dużą ich zbieżność, przy czym najlepiej dopasowana jest funkcja (7).

Dla oceny wpływu obecności piany metalowej w rurze na opory przepływu układu gaz-ciecz zaznaczono na rys. 2 ich wartości oszacowane zgodnie z równ. (1) i (6), które są powszechnie uznane dla przepływów dwufazowych w rurach niewypełnionych. Zmierzone wartości oporów okazały się być aż o dwa rzędy wyższe od wartości oczekiwanych dla przepływu w pustej rurze.

Dużych strat ciśnienia układu dwufazowego gaz-ciecz podczas jego przepływu przez fragment rury wypełniony pianą metalową nie należy jednak tłumaczyć jedynie wzrostem prędkości substancji na skutek (wynikającego z obecności tej piany) zmniejszenia się swobodnego pola przekroju porzecznego rury. Porowatość użytej do badań piany wynosiła aż 93%, a zatem wzrost tej prędkości nie był na tyle znaczący, ażeby wywołać aż tak duży wzrost oporów. Dodatkowych przyczyn spadku energii ciśnienia płynącej substancji należy upatrywać w zaburzeniach struktur przepływu dwufazowego, będących wynikiem efektu mieszania się faz i prowadzącego do zmiany właściwości fizycznych mieszaniny

gazu i cieczy. Tym samym należy przyjąć, że piana metalowa pełni również funkcję mieszała statycznego lub promotora burzliwości, a tym samym wywołane jej obecnością turbulencje będą intensyfikować procesy ruchu ciepła.

Częściowe potwierdzenie powyższych tez stanowią czynione w trakcie badań obserwacje dwufazowych struktur przepływu, ujawniających się w pustej rurze za jej wypełnionym pianą odcinkiem. Zgodnie z zadanymi strumieniami gazu i cieczy należało oczekiwać ich struktur rozwarstwionej. Tymczasem w rzeczywistości przepływ był falowy, a w fazie ciekłej występowały dodatkowo pęcherzyki gazu.

Na obecnym etapie prac badawczych brak jest jednak możliwości określenia tego, jaka część energii składającej się na całkowite straty ciśnienia mieszaniny cieczy i gazu jest związana z oporami jej przepływu, a jaka z dodatkowym zaburzeniem (mieszaniami) powodowanym obecnością piany. Wywołana mieszaniami zmiana struktury przepływu dwufazowego jest tożsama ze zmianą stopnia rozproszenia faz. Tym samym inny staje się układ sił oddziaływań pomiędzy elementami płynnej substancji. W przypadku układów dwufazowych suma wszystkich sił wewnętrznych ujawniających się w nich w trakcie przepływu jest traktowana jako wypadkowa siła tarcia wewnętrznego i interpretowana, jako lepkość całej substancji. Poza tym, w obrębie piany (w porównaniu do pustej rury) istotnych różnic można oczekiwać także w odniesieniu do rzeczywistego stopnia zapełnienia kanału przepływowego gazem i cieczą.

Dokładniejsze poznanie i opisanie omawianych zjawisk wymaga jednak prowadzenia dalszych, bardziej szczegółowych badań w tym zakresie.

## Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań i ich analiza pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków, istotnych z punktu widzenia projektowania procesów i aparatury z wykorzystaniem pian metalowych jako wypełnień kanałów przepływowych:

- wysoka wartość strat ciśnienia płynącej układu dwufazowego przez pianę metalową jest wynikiem spadku energii ciśnienia, wywołanego nagłymi i losowymi zmianami kierunku i prędkości lokalnych elementów płynącej substancji;
- piana metalowa może usprawnić proces wymiany ciepła nie tylko na skutek jego bezpośredniego przewodzenia do ściany kanału, lecz także w wyniku zwiększenia burzliwości przepływu mieszaniny dwufazowej;
- równanie (7) stanowiące metodę obliczania oporów przepływu układu gaz-ciecz przez ośrodki porowate jest skuteczne, również w odniesieniu do przepływu przez piany metalowe;
- lepsze poznanie zjawisk związanych z hydrodynamiką przepływu dwufazowego przez piany metalowe wymaga realizacji dalszych, bardziej szczegółowych badań w tym zakresie.

## LITERATURA

- Abadi G.B., Moon C., Kim K.C., (2016). Experimental study on single-phase heat transfer and pressure drop of refrigerants in a plate heat exchanger with metal-foam-filled channels. *Appl. Therm. Eng.*, 102, 423-431. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.03.099
- Dyga R., (2015). Wymiana ciepła i hydrodynamika przepływu przez piany metalowe. Wyd. Pol. Opolskiej, Opole
- Ford L.H., (1960). Multiphase flow through Porous Media with Special Reference to Turbulent Region. Ph.D. Thesis, University of London
- Hu H., Zhu Y., Ding G., Sun S., (2013). Effect of oil on two-phase pressure drop of refrigerant flow boiling inside circular tubes filled with metal foam. *Int. J. Refrig.*, 36, 516-526. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2012.10.037
- Jamialahmadi M., Müller-Steinhagen H., Izadpanah M.R., (2005). Pressure drop, gas hold-up and heat transfer during single and two-phase flow through porous media. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 26, 156-172. DOI: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.07.004
- Ji W.T., Jacobi A.M., He Y.L., Tao W.Q., (2015). Summary and evaluation on single-phase heat transfer enhancement techniques of liquid laminar and turbulent pipe flow. *Int. J. Heat Mass Transf.*, 88, 735-754. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.008
- Ji X., Xu J., (2012). Experimental study on the two-phase pressure drop in copper foams. *Heat Mass Transf.*, 48, 153-164. DOI: 10.1007/s00231-011-0860-2